文章编号:1000-4939(2023)05-1125-08

注浆微型钢管桩抗弯性能研究

印长俊[1,2],易丹萍[1],龚家兴[1]

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院,411105 湘潭;
2. 湘潭大学岩土力学与工程安全湖南省重点实验室,411105 湘潭)

摘 要:为探讨注浆微型钢管桩的抗弯性能,对不同钢管管径、壁厚以及砂浆强度的 12 根试件,采用正交试验方案进行纯弯曲试验,基于试验结果提出极限抗弯承载力表达式,并采用有限元软件 ANSYS 建立模型进行验证。结果表明:注浆微型钢管桩的弯曲全过程可分为 3 个阶段,即,弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段;对注浆微型钢管极限荷载敏感性大小为,钢管管径 > 钢管壁厚 > 砂浆强度等级;不同规程计算的极限抗弯承载力与试验差异较大,本研究所提出的注浆微型钢管桩极限抗弯承载力表达式与试验结果吻合较好,钢管的抗弯承载力约占注浆微型钢管桩总抗弯承载力的 78% ,管内砂浆约占 22% ;有限元模拟结果显示,管内砂浆对微型钢管桩的抗弯性能有较大的提升,验证了所提出的注浆微型钢管桩抗弯承载力表达式的正确性。

关键词:正交试验;微型钢管桩;砂浆强度等级;有限元分析

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.018

Research on flexural performance of grouting micro-steel pile

YIN Changjun[1,2],YI Danping[1],GONG Jiaxing[1]

(1. School of Civil Engineering and Mechanics,Xiangtan University,411105 Xiangtan,China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering Safety,Xiangtan University,411105 Xiangtan,China)

Abstract: In order to explore the flexural performance of grouted micro steel pipe piles,12 specimens with different steel pipe diameters,wall thicknesses and mortar strengths were subjected to pure bending tests using orthogonal test schemes,and the ultimate flexural bearing capacity expression was proposed based on the test results. Formula,and use the finite element software ANSYS to establish a model for verification. The results show that the whole bending process of grouting micro steel pipe pile can be divided into three stages,namely:elastic stage,elastoplastic stage and strengthening stage;the sensitivity to the ultimate load of grouting micro steel pipe is steel pipe diameter > steel pipe wall thickness >mortar strength grade;the ultimate flexural bearing capacity calculated by different regulations is quite different from the test. The expression of the ultimate flexural bearing capacity of the grouted micro steel pipe pile proposed in this paper is in good agreement with the test results. The flexural bearing capacity of the steel pipe It accounts

收稿日期:2022-04-08 **修回日期:**2022-08-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51508489)
通信作者:印长俊,副教授。E-mail:1321761508@qq.com
引用格式:印长俊,易丹萍,龚家兴. 注浆微型钢管桩抗弯性能研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1125-1132.
YIN Changjun,YI Danping,GONG Jiaxing. Research on flexural performance of grouting micro-steel pile[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(5):1125-1132.

for about 78% of the total flexural bearing capacity of the grouted micro steel pipe piles, and the mortar in the pipe accounts for about 22%. The finite element simulation results show that the mortar in the pipe greatly improves the flexural performance of the micro steel pipe piles. The correctness of the expression of the flexural bearing capacity of the grouted micro-steel piles proposed is recommended to be promoted.

Key words: orthogonal test; micro steel pipe pile; mortar strength grade; finite element analysis

注浆微型钢管桩一般是指桩径小于400 mm,长细比大于30,采用压力注浆等工艺后,形成的复合桩体[1]。微型钢管桩仅需轻型施工机具,桩位布置灵活,施工速度快,场地适应性强,近年来得到了越来越广泛的应用[2-3]。

国内外对注浆微型钢管桩的研究主要集中在讨论其竖向承载力,而对抗弯承载力的研究较少,国内外仍然处于起步阶段[4-8],对于其抗弯承载力计算缺乏统一的设计标准[9]。王友元等[10]通过对钢管桩与核心混凝土的黏结力及抗弯应力传递模拟实验研究指出在钢管混凝土桩中钢管和混凝土的共同作用是可靠的。吉伯海等[11]通过对圆钢管轻集料混凝土构件抗弯性能试验研究指出钢管内轻集材料对提高钢管构件抗弯能力效果显著,在相同条件下,钢管轻集料混凝土构件与普通钢管混凝土构件极限抗弯承载力大致相同。唐咸远等[1]通过试验对注浆微型钢管桩抗弯承载力进行了测定,研究了构件在荷载作用下的变形特征及荷载与应变的关系,并将试验结果与不同标准的计算值进行了对比,结果表明注浆微型钢管桩的抗弯刚度试验值与 AIJ(2002)推荐算式的计算值吻合良好。王少杰等[12]通过对单根微型钢管的荷载-挠度曲线、环向应变分布规律等研究,结果表明注浆体对提高微型钢管抗弯能力效果非常显著,仅考虑钢管强度而未考虑注浆体强度的方法过于保守。

注浆微型钢管桩作为微型桩的其中一种类型,国内外对其力学性能研究甚少,设计时参照普通钢管混凝土的相关标准进行计算,缺乏统一的设计计算标准[1]。由于普通钢管混凝土构件与注浆微型钢管桩在材质、尺寸、填充材料等方面都有很大的区别,所以非常有必要对注浆微型钢管桩的力学性能进行研究。本研究通过选用钢管直径、钢管壁厚以及砂浆强度等级这 3 种因素,采用正交试验方案对 12 根注浆微型钢管试件进行纯弯曲试验,并对各因素的敏感性进行分析,参考规程 GB 50396-2014,并基于试验结果提出极限抗弯承载力表达式,采用有限元软件 ANSYS 进行验证,得出的结论可为注浆微型钢管桩的工程实践提供借鉴与参考。

1 正交试验方案设计

1.1 极差分析法

极差分析法由于具有直观形象简单易懂、计算简便等优点,在正交试验结果分析中被广泛使用。其计算公式为

$$R_j = \max|K_{ij} - K_{kj}| \tag{1}$$

式中:K_{ij}为第 i 位级(水平标号),第 j 列(因素标号)的考核指标平均值;K_{kj}为第 k 位级(水平标号),第 j 列(因素标号)的考核指标平均值,其中 $i,k \in (1,n)$,n 为因素的水平数;R_j代表第 j 列因素的极差,其值反映出该列因素水平发生变化时,随试验指标的变化幅度。由公式可以看出,R_j越大,代表该因素对试验指标的影响越明显。因此可以根据 R_j的大小判断出各因素的影响大小。

1.2 方案设计

本试验分别以钢管桩径(R)、壁厚(t)和砂浆强度等级(C)这 3 个因素作为研究对象。采用标准正交试验,钢管的桩径分别取 89、114 mm,壁厚分别取 2、3 mm,砂浆强度等级分别取 M10、M20、M30。因素水平表见表 1。钢管试件的相关参数见表 2。

表 1 因素水平表

Tab. 1 Factor level table

水平	因素		
	R/mm	t/mm	C
1	89	2	M10
2	114	3	M20
3	–	–	M30

表 2 钢管型号及相关参数

Tab. 2 Steel pipe model and related parameters

$R \times t$	I/mm^4	W/mm^3
89 mm × 2 mm	517 460	11 628
89 mm × 3 mm	750 248	16 859
114 mm × 2 mm	1 103 780	19 365
114 mm × 3 mm	1 612 379	28 287

钢管采用 Q235 级圆形钢管，设计跨度 L_0 = 1 500 mm，实际长度 L = 2 000 mm；本试验设计使用 3 种不同强度等级的砂浆作为微型钢管桩的填充材料，材料的组成为 42.5 普通硅酸盐水泥、中砂、自来水，配合比见表 3。砂浆的抗压强度依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》JGJ/T 70-2009，通过边长 70.7 mm 立方体试块同等养护条件下测得，见表 4。

表 3　砂浆配合比

Tab. 3 Mortar mix proportion

C	水泥/kg	中砂/kg	自来水/kg
M10	306.4	1 826.5	338
M20	445.3	1 826.5	368
M30	584.0	1 800.0	338

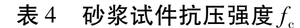


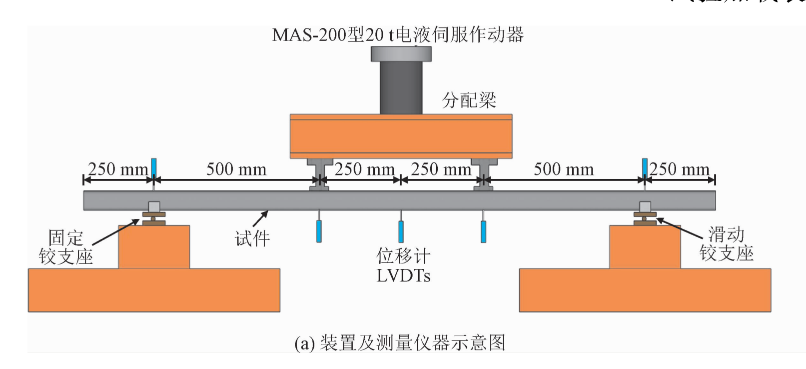
表 4　砂浆试件抗压强度 f_c

Tab. 4　Compressive strength of mortar specimens

C	f_c/MPa
M10	13.77
M20	22.80
M30	32.17

1.3　试验加载装置及测量方案

本试验采用杭州邦威公司生产的 MAS-200 型 20 t 电液伺服作动器进行加载，并用压力传感器量测加载力。加载时按 3 kN/min 的加载速度施加荷载；当荷载达到大约为预计极限荷载的 60% 后，将加载速度减半至 1.5 kN/min，直至试件破坏。试验过程中观察和记录破坏现象、测试荷载和变形。采用 5 个位移计量测跨中、1/4 桩身和支座处的位移。试验加载装置及测量仪器布置如图 1 所示。



(a) 装置及测量仪器示意图



(b) 装置及测量仪器布置图

图 1　试验装置及测量仪器布置示意图

Fig. 1　Test device and measuring instrument layout diagram

2　正交试验结果分析

2.1　试验现象及破坏形态

对 R = 89 mm、t = 2 mm、砂浆强度等级为 M20 的钢管桩试验过程中测得的数据进行汇总和处理，得到荷载-跨中挠度曲线，由图 2 可知，试件加载阶段荷载-挠度曲线大致可分为弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段 3 个阶段。

加载初期，荷载-跨中挠度曲线呈直线上升，说明注浆微型钢管处于弹性工作阶段。随着加载的进行，钢管内砂浆被压碎，发出轻微的开裂声音。当荷载增加至 20 kN 时，注浆微型钢管跨中挠度很小，但肉眼可见，此时荷载-跨中挠度曲线呈曲线上升状态，说明注浆微型钢管进行弹塑性工作阶段。当荷载增加至 25 kN 时，位移计读数迅速增大，注浆微型

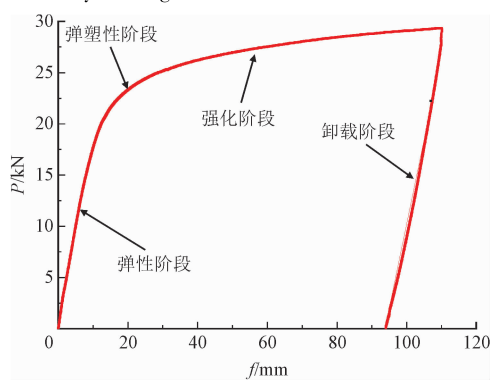


图 2　注浆微型钢管桩荷载-跨中挠度曲线

Fig. 2　Load mid span deflection curve of grouting micro steel pipe

钢管进入强化阶段，此时荷载-跨中挠度曲线仍处于曲线上升阶段。当跨中挠度达到 104 mm 时，荷载仍能有所增加，说明注浆微型钢管有较好的延性，在挠度较大时仍未断裂。由于试件跨中挠度已经非常明显，为防止继续加载使得挠度进一步增大，同时也为

避免由于支座转角过大进而脱落造成安全隐患，停止继续加载并开始卸载，当荷载卸载至0 kN后，将试件取出。

图3为试件表观破坏图。如图3所示，试件表观破坏形态呈现出跨中部位挠曲位移过大导致承载能力不足而发生失效破坏。图4为试件局部破坏形态图。由图4可知，试件的最终破坏形态大多以跨中多褶皱鼓曲的塑性破坏为主，钢管表面有多道环向褶皱。多褶皱鼓曲破坏形态表明试件径向约束作用强，套箍效应良好，初始开裂的砂浆在钢管环向约束作用下重新挤压成形，钢管受压面不断出现新的褶皱，最终形成弯曲受压破坏形态。切开跨中部位钢管，其内部砂浆出现多道裂纹，并未出现砂浆溃烂现象，表现出良好的套箍效应。



图3 试件表观破坏图

Fig. 3 Apparent failure diagram of specimen

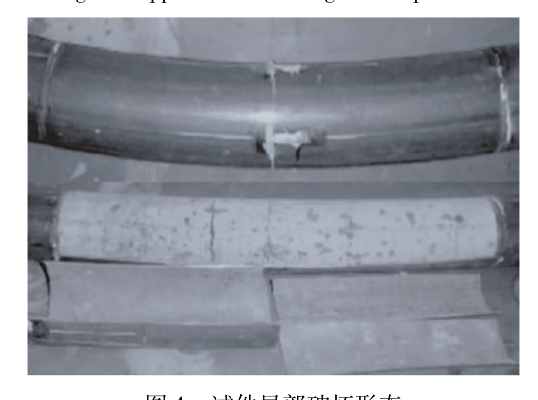


图4 试件局部破坏形态

Fig. 4 Local failure mode of specimen

2.2 结果分析

本研究以微型钢管的极限荷载(P)作为考核指标对正交试验的结果进行极差分析，正交试验表及试验结果见表5。

文献[17]研究表明弹性阶段结束时的荷载约为极限荷载的0.7倍，即极限荷载为弹性阶段结束时的1.4倍。本试验未监测钢管应变情况，因而无法得到试验过程中最大拉应变与荷载的关系曲线。故本研究采用弹性阶段结束时荷载的1.4倍为极限荷载。

表5 正交试验表及试验结果

Tab. 5 Orthogonal test table and test results

试验号	R/mm	t/mm	C	P/kN
S1	89	2	M10	12.25
S2	89	2	M20	13.84
S3	89	2	M30	15.78
S4	89	3	M10	18.62
S5	89	3	M20	20.13
S6	89	3	M30	21.44
S7	114	2	M10	21.89
S8	114	2	M20	23.75
S9	114	2	M30	25.86
S10	114	3	M10	31.16
S11	114	3	M20	32.92
S12	114	3	M30	36.02

根据计算结果，排出R_j大小，因此可以得出钢管桩径、壁厚及砂浆强度3个因素对钢管桩极限荷载影响的主次顺序，如表6所示。

表6 钢管极限荷载极差分析表

Tab. 6 Analysis of extreme load of steel pipe

考核指标	统计参数	R	t	C
P	K_{1j}	20.43	21.59	24.67
	K_{2j}	32.117	31.01	25.29
	K_{3j}	–	–	28.94
	R_j	11.69	9.42	4.27

根据极差分析表6中R_j可知，对钢管极限荷载敏感性大小为钢管管径R(11.69)>钢管壁厚t(9.42)>砂浆强度等级C(4.27)，钢管管径对钢管极限荷载的影响最大。从极限荷载趋势分析图5可知，钢管管径、壁厚以及砂浆强度等级增加，钢管的极限荷载也逐渐增大，钢管管径影响效果最大，壁厚次之，砂浆强度等级影响最小，这是因为钢管管径以及壁厚增加，钢管构件抗弯截面模量也随之增加，由抗弯截面模量表达式可知钢管管径对其影响较大，理论分析与试验结果分析一致。随着砂浆强度等级增大，钢管的极限荷载虽变化较小，但仍有增大，故不可忽略砂浆强度变化对钢管桩的影响。

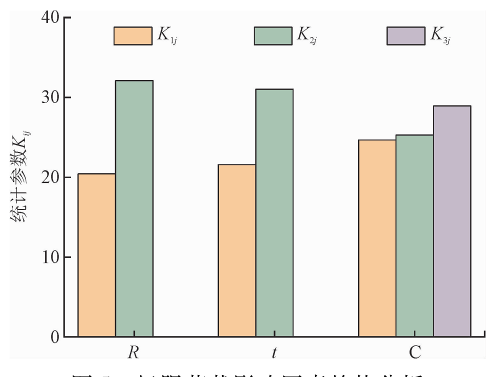


图 5　极限荷载影响因素趋势分析

Fig. 5　Trend analysis of influencing factors of ultimate load

3　极限抗弯承载力计算

对于微型钢管桩抗弯承载力的计算，设计时一般参照普通钢管混凝土的相关计算模型。国内外关于钢管混凝土的设计标准较多，其中具有代表性的有美国规程 AISC-LRFD（1994）[13]、日本规程 AIJ（1997）[14]和欧洲规程 EC4（1994）[15]，以及国内规程 GB 50396-2014[16]。大多的规程都以钢管混凝土的统一理论为基础计算极限抗弯承载力，并未将钢管与混凝土进行拆分对比。本研究基于注浆微型钢管试验结果，参考规程 GB 50396-2014，将钢管和管内砂浆进行区分，建立注浆微型钢管桩极限抗弯承载力 M_u 表达式，即

$$M_u = K_s M_s + K_c M_c \tag{2}$$

其中：K_s、K_c 为套箍效应影响系数；M_s、M_c 为分别为钢管、砂浆的抗弯承载力特征值，MPa。

$$M_s = fW_s \tag{3}$$

$$M_c = f_c W_c \tag{4}$$

其中：f 为钢材抗压强度设计值；f_c 为砂浆的抗压强度设计值；W_s 为钢管截面模量，m^3；W_c 为砂浆截面模量，m^3。

$$K_s = \alpha \tag{5}$$

$$K_c = \beta(1.212 + B\theta + C\theta^2) \tag{6}$$

$$\theta = \alpha_{sc} \frac{f}{f_c} \tag{7}$$

$$\alpha_{sc} = \frac{A_s}{A_c} \tag{8}$$

其中：α、β 为需要拟合的系数；θ 为实心或空心钢管混凝土构件的套箍系数；α_{sc} 为实心或空心钢管混凝土构件的含钢率；A_s、A_c 分别为钢管、管内砂浆截面积；f 为钢材抗压强度设计值；f_c 为砂浆的抗压强度设计值；B、C 为截面形状对套箍效应的影响系数，对实心圆截面，$B = 0.176f/213 + 0.974$，$C = -0.104f_c/14.4 + 0.031$。

通过非线性回归分析可得参数 $\alpha = 1.24$、$\beta = 0.33$，整体相关性系数 $R^2 = 0.947$。

因此，注浆微型钢管桩的极限抗弯承载力 M_u 表达式为

$$M_u = 1.23M_s + 0.33(1.212 + B\theta + C\theta^2)M_c \tag{9}$$

将式(9)以及各规范推荐公式计算所得的极限弯矩 M_c 与试验所得的极限弯矩 M_{ue} 进行比较，结果如表 7 所示。

表 7　各公式计算值 M_c 与极限弯矩试验值 M_{ue} 比较

Tab. 7　Comparison between calculated value M_c of each formula and test value M_{ue} of ultimate bending moment

试验号	M_{ue}/(kN·m)	AISC(1994)、AIJ(1997)		EC4(1994)		GB 50396-2014		式(9)	
		M_c/(kN·m)	M_c/M_{ue}	M_c/(kN·m)	M_c/M_{ue}	M_c/(kN·m)	M_c/M_{ue}	M_c/(kN·m)	M_c/M_{ue}
S1	3.66	2.73	0.75	5.35	1.46	3.19	0.87	3.79	1.04
S2	4.24	2.73	0.64	5.36	1.26	4.07	0.96	4.01	0.95
S3	4.28	2.73	0.64	5.37	1.26	4.99	1.17	4.25	0.99
S4	5.71	3.96	0.69	7.77	1.36	4.04	0.71	5.32	0.93
S5	5.83	3.96	0.68	7.79	1.34	4.87	0.84	5.51	0.95
S6	6.93	3.96	0.57	7.80	1.13	5.78	0.83	5.73	0.83
S7	6.25	4.55	0.73	8.90	1.42	5.89	0.94	6.43	1.03
S8	6.49	4.55	0.70	8.93	1.38	7.76	1.20	6.93	1.07
S9	7.47	4.55	0.61	8.95	1.20	9.72	1.30	7.45	1.00
S10	8.73	6.64	0.76	13.02	1.49	7.32	0.84	9.09	1.04
S11	9.05	6.64	0.73	13.05	1.44	9.14	1.01	9.54	1.05
S12	10.27	6.64	0.65	13.08	1.27	11.07	1.08	10.02	0.98
平均值			0.679		1.334		0.978		0.987
均方差			0.003		0.013		0.031		0.005

由表 7 可知,不同标准所计算出的抗弯极限承载力有明显的差异,其中 AISC(1994)与 AIJ(1997)计算结果较试验值偏低,究其原因是该规范在计算极限抗弯承载力时忽略了钢管内砂浆对整体构件的抗弯贡献,仅考虑钢管的作用,故计算值较低,所得计算结果偏于安全。欧洲规程 EC4(1994)计算结果约是试验结果的 1.334 倍,该规程在计算时虽考虑了钢管内砂浆的贡献,但并没有考虑钢管与管内砂浆之间的组合作用,因此比试验结果大。GB 50396-2014 以及式(9)都与试验值吻合较好,但 GB 50396-2014 属于普通钢管混凝土的计算标准,由于普通钢管混凝土构件与注浆微型钢管桩在材质、尺寸、填充材料等方面都有很大的区别,而式(9)是在 GB 50396-2014 基础上,将钢管与管内砂浆对整个钢管混凝土构件所带来的影响进行区分,结合多组注浆微型钢管桩试验所提出的,其 M_c/M_{ue} 平均值为 0.987,均方差为 0.005,与其它规范计算值相比符合最好,因此式(9)较 GB 50396-2014 更适用于注浆微型钢管桩抗弯极限承载力的计算,建议推广。

根据提出的极限抗弯承载力计算模型,计算钢管与管内混凝土提供的抗弯承载力占比如图 6 所示,其中钢管平均占构件总抗弯承载力的 78%,而管内混凝土平均占 22%,钢管对于抗弯承载能力的影响占据主导地位。且从图中可知管径 R 由 89 mm 增加至 114 mm,钢管内混凝土的抗弯承载力占比约增加 2.5%;当钢管壁厚 t 由 2 mm 增加至 3 mm,钢管内混凝土的抗弯承载力占比约减少 4.17%;砂浆强度 C 每增加 10 MPa,管内混凝土的抗弯承载力占比约增加 4.25%。因此增加钢管内砂浆体积与砂浆强度等级都将会提高砂浆抗弯承载力占比。

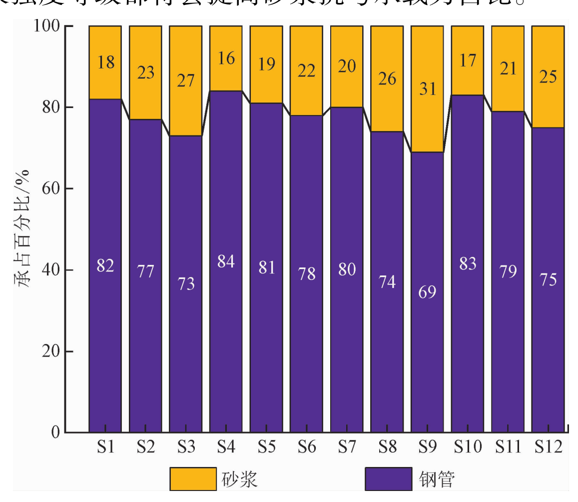


图 6 各试件抗弯承载力占比

Fig. 6 Proportion of bending capacity of each specimen

4 有限元分析计算

引用文献[17]中的工程案例参数,采用单根微型钢管桩进行支护。基坑开挖深度为 8 m,土层为黄土,重度 16.5 kN/m^2,弹性模量 18 MPa,黏聚力 15 kPa,内摩擦角 22°。微型钢管桩桩长 14 m,桩直径 330 mm,壁厚 30 mm,嵌固深度 6 m。钢管桩上部为 6 m 高边坡采用框架预应力锚杆支护,本研究仅对微型钢管桩部分进行计算分析,故将上部 6 m 厚土体等效为地面超载 q 作用于坡后土体顶部,计算得 $q = 50$ kN/m。微型钢管桩数值分析模型如图 7 所示。

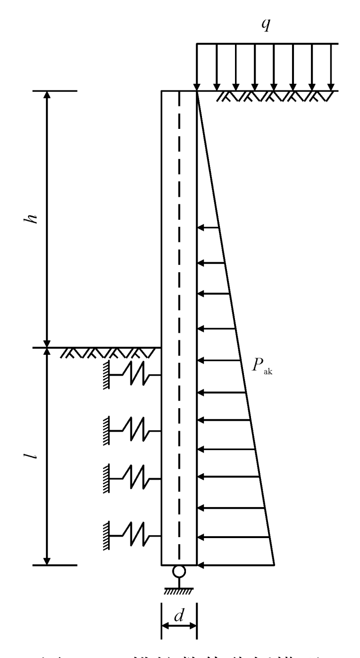


图 7 三排桩数值分析模型

Fig. 7 Numerical analysis model of three row piles

4.1 模型的建立

将钢管桩离散为梁单元。钢管桩土层抗力采用弹簧单元模拟,模拟地基抗力的弹簧刚度为[18]

$$k_s = m(z - h) \tag{10}$$

式中:m 为地基水平抗力比例系数;z 为计算点距地面的深度;h 为计算工况下的基坑开挖深度。

地基水平抗力系数比例系数 m 按桩的水平荷载试验及地区经验取值,当缺少试验和经验时,按下列经验公式计算[18],即

$$m = \frac{0.2\varphi^2 - \varphi + c}{v_b} \tag{11}$$

式中,v_b 为挡土构件在坑底出的水平位移量,mm。

当此时水平位移不大于 10 mm，可取 10 mm。

模型采用有限元分析软件 ANSYS 进行计算。微型钢管桩单元采用 beam 单元进行模拟，桩间土的土弹簧采用 combin 单元进行模拟。

4.2　有限元结果分析

将空心钢管桩抗弯性能与注浆微型钢管桩抗弯性能有限元计算结果进行对比(见图 8)。由图 8 可知，在考虑管内砂浆对微型钢管桩抗弯刚度的贡献后，桩体的最大水平位移减幅为 5.52%，最大弯矩增幅为 18.95%。原因是由于微型钢管桩管径小，柔度大，其抗弯能力有限，在微型钢管桩灌入砂浆后，砂浆与钢管组合成刚度更高的钢管混凝土桩，在减小结构水平位移时微型钢管桩需要承担更大的内力。这与结构力学中“刚度大，位移小，内力大”的定性规律相一致。因此在实际工程设计计算时，应考虑灌入砂浆对微型钢管桩结构抗弯性能的影响。

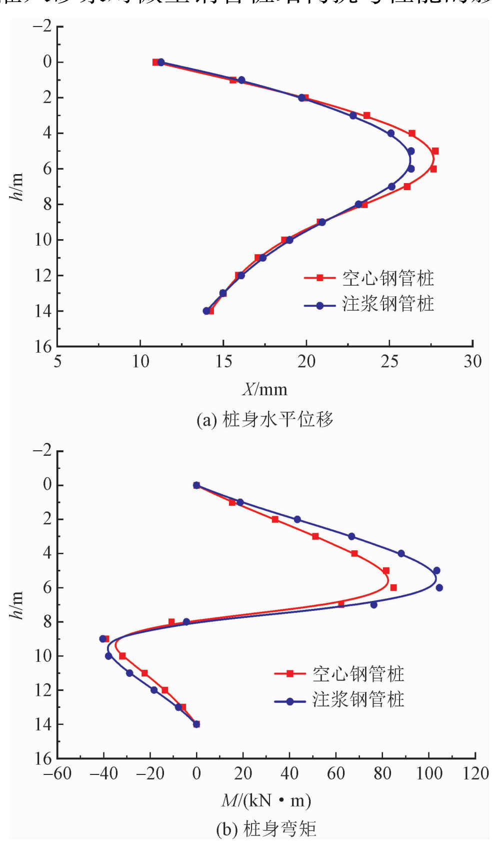


图 8　空心钢管桩与注浆微型钢管桩抗弯性能对比

Fig. 8　Comparison of bending performance between hollow steel pipe pile and grouting micro steel pipe pile

根据图 8 有限元分析结果得出钢管与管内砂浆提供的抗弯承载力占比图(见图 9)，由图 9 可知注浆微型钢管桩在土体内不同深度条件下的各组分承载力占比不同。其中钢管平均占构件总抗弯承载力的 78.78%，管内混凝土平均占 21.22%，与前文试验对比误差约为 1%，有极高的吻合度，模拟结果与试验结果类似，钢管占据承载力的主导作用，从而验证了本研究提出的注浆微型钢管桩抗弯承载力表达式的正确性。

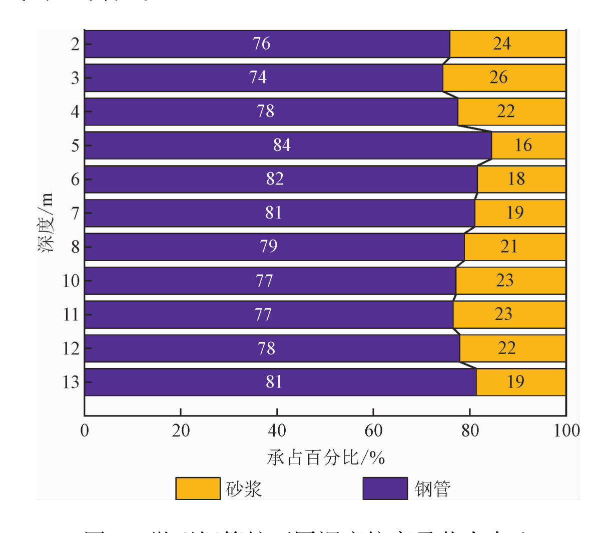


图 9　微型钢管桩不同深度抗弯承载力占比

Fig. 9　Proportion of bending capacity of micro steel pipe pile at different depths

5　结　论

通过采用正交试验设计，对 12 根不同管径、壁厚和灌入砂浆等级的注浆微型钢管桩进行纯弯曲试验，从试件的表观破损全过程、钢管的失效形态、荷载—跨中挠度曲线等多个角度分析破坏机理。基于试验结果提出适合注浆微型钢管桩的抗弯承载力计算公式，并运用有限元软件对该公式进行验证。得到如下结论。

1)本研究通过对钢管管径为 89 mm、钢管壁厚为 2 mm、砂浆强度为 M20 的钢管试件荷载-跨中挠度曲线分析，将微型钢管桩的弯曲全过程分为 3 个阶段，即：弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。

2)通过 12 根钢管的正交试验极差分析，结果表明：对钢管极限荷载敏感性大小为钢管管径(11.69)＞钢管壁厚(9.42)＞砂浆强度等级(4.27)

3)参考规范 GB 50396-2014，提出注浆微型钢管桩抗弯承载力计算公式，M_c/M_{ue}的平均值为 0.987，方差为 0.005，计算结果与试验结果较吻合，且钢管抗弯承载力约占构件总抗弯承载力的 78%，管内砂浆约占 22%，管内砂浆体积以及砂浆强度强度等级

增加都将使得管内砂浆抗弯承载力占比增加。

4)通过对空心钢管桩与注浆微型钢管桩抗弯性能有限元分析研究,结果表明:灌入砂浆能提高微型钢管桩结构抗弯性能;空心钢管抗弯承载力约占构件总抗弯承载力的 78.78%,管内砂浆占 21.22%,与3)结论误差仅为 1%,验证了本研究提出的注浆微型钢管桩抗弯承载力表达式的正确性。

参考文献:

[1] 唐咸远,杨和平,肖杰,等.注浆微型钢管桩抗弯承载力及抗弯刚度研究[J].工业建筑,2016,46(10):89-94.
TANG Xianyuan, YANG Heping, XIAO Jie, et al. Experimental study of flexural behavior of grouted micro steel pipe piles[J]. Industrial construction,2016,46(10):89-94(in Chinese).

[2] 朱宝龙,胡厚田,张玉芳,等.钢管压力注浆型抗滑挡墙在京珠高速公路 K108 滑坡治理中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):399-406.
ZHU Baolong, HU Houtian, ZHANG Yufang, et al. Application of steel-tube bored grouting anti-sliding retaining wall to treatment of landslide K108 in Beijing-Zhuhai expressway[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2006,25(2):399-406(in Chinese).

[3] 刘凯,刘小丽,苏媛媛.微型抗滑桩的应用发展研究现状[J].岩土力学,2008,29(增刊1):675-679.
LIU Kai, LIU Xiaoli, SU Yuanyuan. Research on application development of anti-slide micropiles[J]. Rock and soil mechanics, 2008,29(S1):675-679(in Chinese).

[4] ARMOUR T, GRONECK P, KEELEY J, et al. Micropile design and construction guidelines: Implementation manual[EB/OL]. (2000-06-01)[2022-01-30]. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/39059.

[5] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns[J]. Journal of constructional steel research, 2002,58(5/6/7/8):725-758.

[6] SOOMRO M A, NG C W W, MEMON N A, et al. Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunnelling in dry sand: 3D centrifuge tests and numerical modelling[J]. Computers and geotechnics,2018,101:48-64.

[7] 武志信,吴红刚,赖天文,等.微型桩加固土质边坡的动土压力响应及其频谱特性研究[J].岩土力学,2019,40(10):3909-3919.
WU Zhixin, WU Honggang, LAI Tianwen, et al. Dynamic soil pressure response and its spectrum characteristics of soil slope reinforced by micro-pile[J]. Rock and soil mechanics,2019,40(10):3909-3919(in Chinese).

[8] 潘健,袁文俊,韦莎丽,等.微型钢管灌注桩的竖向承载性状研究[J].岩土工程学报,2019,41(增刊1):77-80.
PAN Jian, YUAN Wenjun, WEI Shali, et al. Shaft bearing behaviors of micro cast-place piles with steel tubes[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2019,41(S1):77-80(in Chinese).

[9] 白晨光,贾立宏,马金普,等.抗弯功能微型桩在基坑支护中的应用[J].岩土工程学报,2006,28(增刊1):1656-1658.
BAI Chenguang, JIA Lihong, MA Jinpu, et al. Application of micropiles with anti-bending function to retaining and protection of foundation excavation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2006,28(S1):1656-1658(in Chinese).

[10] 王友元,苏林王.钢管桩与混凝土芯粘结力及抗弯应力传递模拟试验研究[J].水运工程,2005(9):3-6.
WANG Youyuan, SU Linwang. Model experimental study on bonding strength and bending stress transfer between steel pile and concrete core of CFST pile[J]. Port & waterway engineering, 2005(9):3-6(in Chinese).

[11] 吉伯海,胡正清,陈甲树,等.圆钢管轻集料混凝土构件抗弯性能的试验研究[J].土木工程学报,2007,40(8):35-40.
JI Bohai, HU Zhengqing, CHEN Jiashu, et al. An experimental study on the behavior of lightweight aggregate concrete filled circular steel tubes under pure bending load[J]. China civil engineering journal,2007,40(8):35-40(in Chinese).

[12] 王少杰,刘福胜,段绪胜,等.抗弯功能微型桩试验研究与应用[J].建筑科学,2009,25(11):73-75.
WANG Shaojie, LIU Fusheng, DUAN Xusheng, et al. Experimental study and application on micro piles with anti-bending function [J]. Building science,2009,25(11):73-75(in Chinese).

[13] ANON. AIST 360-10 load and resistance factor design specification for strutural steel bulidings: AIST 360-10[S]. [S.l.]: [s.n.],2010.

[14] AIJ. Recommendations for design and cbnstruction of concrete filled steel tubular:标准编号缺失[S].[S.l.]:[s.n.],2002.

[15] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1994-1-1:2004[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization,2004.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢管混凝土结构技术规范:GB 50936-2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[17] 董建华,庄超.深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析[J].岩石力学与工程学报,2019,38(3):619-633.
DONG Jianhua, ZHUANG Chao. Mechanical properties of the combined retaining structure of frame prestressed anchors and micro steel tube piles in deep foundation pits[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2019,38(3):619-633(in Chinese).

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

(编辑 史淑英)